



Conception d'un ancrage par collage, optimisé grâce à la dépendance du comportement de l'adhésif vis à vis de la pression hydrostatique

Sylvain Chataigner, Christophe Aubagnac, Jean-François Caron

► To cite this version:

Sylvain Chataigner, Christophe Aubagnac, Jean-François Caron. Conception d'un ancrage par collage, optimisé grâce à la dépendance du comportement de l'adhésif vis à vis de la pression hydrostatique. *Revue des composites et des matériaux avancés* = *Journal of Composite and Advanced Materials*, 2012, 22 (2), pp. 219-236. 10.3166/rcma.22.219-236 . hal-00852032

HAL Id: hal-00852032

<https://hal.science/hal-00852032>

Submitted on 19 Aug 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Conception d'un ancrage par collage, optimisé grâce à la dépendance du comportement de l'adhésif vis à vis de la pression hydrostatique

S. Chataigner * – **C. Aubagnac **** – **J.F. Caron *****

* LUNAM Université, IFSTTAR, SOA, F-44341 Bouguenais, France
sylvain.chataigner@ifsttar.fr

** DL Autun – CETE de Lyon, F- 71405 AUTUN Cedex, France

*** Université Paris Est, Laboratoire Navier (UMR CNRS-École des Ponts Paris Tech-IFSTTAR), 6-8 avenue Blaise Pascal, F-77455 Marne La Vallée, France

RÉSUMÉ. La technique du collage structural s'avère être de plus en plus utilisée dans le domaine du génie civil que ce soit dans le cadre de travaux de renforcements pour le collage d'éléments additionnels ou que ce soit dans le cadre de la réalisation de nouvelles structures en remplacement des techniques d'assemblages usuelles. Le collage structural induit cependant des concentrations de contraintes aux extrémités du joint collé et de nombreux auteurs se sont donc attachés à les étudier pour les réduire et par conséquent augmenter la capacité de l'assemblage, voire sa durée de vie. Toutes ces études concernent donc l'optimisation du transfert des efforts par collage. On s'intéresse ici à l'étude du rôle de la pression hydrostatique sur les capacités ultimes des adhésifs utilisés. Celle-ci permet de nous intéresser ensuite à une nouvelle forme de joint collé, à savoir, le joint « courbe » qui permet de créer naturellement une composante de compression hors plan du joint collé en extrémité. Dans un premier temps, une modélisation en mécanique linéaire classique est conduite pour étudier l'influence de différents paramètres géométriques sur les contraintes, puis nous nous intéressons à la mécanique de la rupture pour étudier la propagation d'éventuelles fissures pour cette nouvelle géométrie. Après avoir mené notre étude théorique, nous présentons ensuite quelques essais quasi-statiques comparant joint plan et joint courbe. Les résultats de ces investigations sont ensuite exploités au regard des divers développements théoriques exposés. Un brevet vient d'être déposé pour cette nouvelle géométrie, et des essais additionnels sont en cours de réalisation, mais le joint courbe semble prometteur.

ABSTRACT. Structural adhesive bonding is getting very popular in civil engineering either for strengthening operations involving the bonding of external reinforcements or to replace traditional assembly techniques in new structures. However adhesive bonding induces stress concentrations at the edges of the joint, and many studies were undertaken in order to reduce

these phenomena and increase the capacity and service life of the assembly. A crucial issue is to optimize shear stress transfer in adhesively bonded joints. This paper investigates the role of hydrostatic pressure on the ultimate capacity of epoxy adhesives used in civil engineering. This led us to investigate a new curved joint geometry that naturally creates compressive stresses at the edge of the joint. In a first part, classical modelling is conducted to determine how the geometry affects the stress field within the joint. Then, fracture mechanics is used to investigate crack propagation. Complementary experimental investigations are finally presented, i.e., quasi-static tests which compare classical shear lap joints to curved joints. Experimental results are thus exploited using the abovementioned modelling.

MOTS-CLÉS: ancrage courbe, pression hydrostatique, collage structural

KEYWORDS: curved joint geometry, stress optimization, hydrostatic pressure

1. Introduction

La technique du collage comme moyen d'assemblage n'est pas récente, mais son utilisation pour des applications de nature structurale l'est davantage. Cette notion de collage structural est apparue au milieu du vingtième siècle avec l'avènement des résines de synthèse, et la technique est aujourd'hui appliquée dans de nombreux domaines : aéronautique, nautique, et génie civil. Dans le cas du génie civil, le collage structural est employé principalement dans le domaine de la réparation ou du renforcement des structures par collage de tôles en acier ou encore par collage de matériaux dits composites (Hamelin, 2002). Mais, de nombreuses études s'attachent aujourd'hui à l'utiliser également comme technique d'assemblage à part entière dans le cas de structures neuves.

En ce qui concerne les techniques de réparation ou de renforcement, Le Laboratoire Navier, L'IFSTTAR (ex. LCPC), et le Département Laboratoire d'Autun qui vient de créer une Equipe Ressource « collage et matériaux composites », s'investissent depuis plusieurs années pour étudier le fonctionnement et la durabilité des joints collés (Limam et al, 2003 ; Clément et Chaussadent, 2006 ; Chataigner et al., 2007). Des études expérimentales sont en cours sur le sujet, mais au vu des premières investigations, il est certain que les phases de conception et de mise en œuvre des joints collés structuraux ont un impact évident sur la tenue à long terme des assemblages. Cette étude s'attache à mieux comprendre les problématiques liées à la conception des assemblages collés et propose une première réflexion pour optimiser le fonctionnement des joints.

En ce qui concerne les structures neuves, le collage structural peut intervenir pour deux types d'assemblages différents : les assemblages classiques entre éléments d'un même matériau, et les assemblages pour structures multi-matériaux. Pour les structures acier, il paraît évident que le collage structural ne constituera qu'une technique mineure

par rapport à la soudure. Mais dans le cas d'autres structures (bois, béton ou encore composites), la technique du collage structural semble avoir sa place et offre des perspectives intéressantes. Dans le cas des structures composites, le collage structural se révèle être la technique d'assemblage par excellence, car il existe bien souvent une réelle compatibilité chimique entre résine et matériaux puisque les résines les plus utilisées en génie civil sont des résines époxydes, et que les matrices des matériaux composites sont généralement de type époxy. Dans le cas des structures multi-matériaux, on peut citer à titre d'exemple le cas de structures bois-béton étudiées par le Laboratoire Navier et qui comportent une semelle en béton et une âme en bois pour lesquelles les traditionnels connecteurs métalliques ont été remplacés par un adhésif époxy bi-composant (Pham, 2007). Cette structure a fait l'objet d'investigations de fatigue, et des résultats très prometteurs ont été obtenus. Il est certain que ces structures multi-matériaux ont de bonnes perspectives puisqu'elles permettent d'allier les avantages et performances des différents constituants. A l'heure où les problématiques de développement durable sont à la pointe des préoccupations, la technique de collage structural permet d'envisager de nouveaux concepts de structures pour lesquels chacun des matériaux constitutifs est utilisé à l'optimum de ses propriétés physiques et mécaniques. Afin d'assurer d'un fonctionnement adéquat de ces structures, il est cependant nécessaire de comprendre et d'optimiser le mécanisme de transfert des efforts entre les parties assemblées par collage.

Ce constat nous a conduits à approfondir les recherches dédiées aux mécanismes de transfert des efforts et à l'optimisation du fonctionnement des assemblages collés. Le point de départ de la présente étude est l'ancrage d'un hauban appartenant à un concept de passerelle « tout composite » développé au Laboratoire Navier (Caron et al., 2009). Le hauban en question est une lamelle composite constituée d'une matrice époxy et de fibres de carbone, et il est ancré par collage à la passerelle.

Les performances d'un collage sont assujetties à la tenue des différents matériaux en présence (adhésifs et adhérents), mais aussi à celle de l'interface qui est fortement dépendante de la préparation de surface. Cette préparation de surface a une influence sur les efforts d'adhésion, mais aussi sur l'évolution des propriétés à long terme (durabilité). Ce dernier aspect ne sera pas approfondi ici, et nous nous bornerons essentiellement à l'étude de matériaux en présence dans le joint collé, et à l'optimisation de l'assemblage.

Dans un premier temps, le rôle de la pression hydrostatique sur les performances de l'adhésif sera mis en relief. On remarquera que celle-ci permet d'augmenter la capacité des adhésifs étudiés, ce qui nous permettra d'introduire un concept de joint optimisé, dit « joint courbe ». La seconde partie présentera des investigations théoriques sur cette géométrie courbe, visant à vérifier qu'elle joue bien le rôle attendu. Enfin, la dernière partie décrira les premiers essais réalisés au Laboratoire Navier, qui semblent démontrer l'intérêt et le potentiel de ce joint courbe optimisé. Ce travail a été réalisé dans le cadre

d'une thèse (Chataigner, 2008) et a fait l'objet d'un dépôt de brevet (Caron et Chataigner, 2008).

2. Rôle de la pression hydrostatique

Le terme pression hydrostatique n'est pas couramment utilisé dans le domaine des structures de génie civil ; il est plus fréquent dans le domaine de la géotechnique. Afin de clarifier ce terme, quelques rappels généraux seront proposés dans la première partie de ce paragraphe. Ceci nous permettra ensuite de présenter les différents essais qui ont permis d'étudier l'influence de cette pression hydrostatique sur le comportement de différents types d'adhésifs, à savoir des adhésifs ayant un comportement élastique fragile et qui sont couramment utilisés en génie civil, ou un adhésif industriel présentant un comportement de type élastoplastique. Enfin, les résultats de ces essais seront ensuite décrits, et exploités pour conclure sur l'influence de la pression hydrostatique.

2.1. Généralités sur la pression hydrostatique

Il est fréquent de décomposer le champ des contraintes s'appliquant sur un élément en deux parties distinctes : la partie déviatorique qui est associée au champ de cisaillement, et la partie hydrostatique qui, elle, n'est pas associée aux contraintes de cisaillement. La contrainte déviatorique considérée correspond dans la majorité des cas à la contrainte de Von Mises. La contrainte hydrostatique correspond à la moyenne des contraintes normales. Ceci est bien résumé par les équations [1] et [2] où σ_{ij} est la composante du tenseur de contraintes dans le repère (1,2,3), i et j variant entre 1 et 3, et où p est la pression hydrostatique, et q , la contrainte déviatorique.

$$p = -\frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad [1]$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2) + 3\sigma_{12}^2 + 3\sigma_{13}^2 + 3\sigma_{23}^2} \quad [2]$$

A titre indicatif, et peut être pour éclairer les raisons qui conduisent à décomposer un champ de contraintes suivant ces deux composantes, de nombreuses études conduisent à prendre pour critère de rupture ou de plasticité la contrainte de Von Mises pour certains matériaux comme les métaux. Pour d'autres matériaux, comme certains sols par exemple, il est nécessaire d'utiliser un critère mixte linéaire prenant en compte les deux composantes : ce type de critère est connu sous le nom de critère de Drucker-Prager. Dans le cas d'un matériau respectant un critère de Von Mises, son comportement est donc indépendant de la pression hydrostatique. Dans le cas d'un matériau respectant un

critère linéaire de type Drucker-Prager, celui-ci est linéairement dépendant de la composante hydrostatique.

2.2. Présentation des différents essais de caractérisation réalisés

Pour évaluer si la capacité des adhésifs considérés dans cette étude (systèmes commercialisés pour le génie civil) dépend ou non de la pression hydrostatique, il est donc nécessaire d'effectuer plusieurs essais destructifs permettant d'obtenir des couples pression hydrostatique/contrainte déviatorique différents. En théorie, deux essais peuvent suffire. Nous avons décidé de nous appuyer ici sur trois essais en nous inspirant de ce qui est réalisé dans le domaine des matériaux de type céramique (Wang, 2007). Les trois essais utilisés sont des essais sur adhésifs à l'état massif : il s'agit de l'essai de traction simple réalisé sur éprouvettes haltères, de l'essai de compression réalisé sur éprouvettes cylindriques, et de l'essai Brésilien réalisé également sur cylindres (Figure 1). On notera qu'il existe une controverse quant à l'utilisation de propriétés mécaniques déterminées par des essais sur matériaux massifs pour décrire le comportement de ces mêmes matériaux lorsqu'ils sont sous forme de joints minces. Dans le cas des collages réalisés en génie civil, nous avons considéré que les épaisseurs mises en jeu pour les joints de colle sont suffisamment importantes (supérieures à 0.5 mm et souvent voisines du mm) pour pouvoir corréler les propriétés des matériaux massifs à celles des joints.

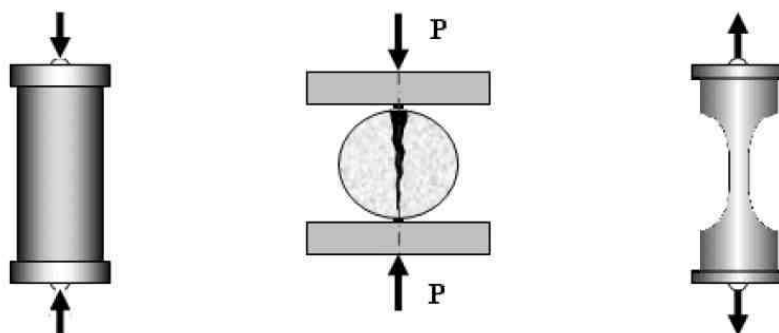


Figure 1. Description des trois différents essais réalisés (Essai de compression, brésilien, et essai de traction)

A partir des résultats à la rupture ou en termes de limite élastique obtenus par ces différents essais, il est possible de déterminer trois points de l'enveloppe de rupture ou du domaine élastique du matériau adhésif étudié. Les formules permettant d'obtenir les couples pression hydrostatique/contrainte déviatorique (de Von Mises) pour chacun de ces trois essais sont données dans le Tableau 1. On notera que P correspond à l'effort à

la rupture ou effort limite, D au diamètre du cylindre, L à la hauteur du cylindre, et A à la section centrale de l'éprouvette haltère.

Tableau 1 : *Couples pression hydrostatique/contrainte déviatorique pour les trois essais considérés.*

	Résultat	Pression hydrostatique	Contrainte de Von Mises
<i>Compression simple</i>	$\sigma_c = \frac{P}{\pi \frac{D^2}{4}}$	$\frac{1}{3} \sigma_c$	σ_c
<i>Essai brésilien</i>	$\sigma_b = \frac{2P}{\pi DL}$	$\frac{2}{3} \sigma_b$	$\sqrt{13} \sigma_b$
<i>Traction simple</i>	$\sigma_t = \frac{P}{A}$	$-\frac{1}{3} \sigma_t$	σ_t

2.3. Résultats des essais et conclusion

Deux adhésifs utilisés en génie civil dans le domaine du renforcement par matériaux composites ont été plus précisément étudiés : il s'agit des systèmes Etancol 492 et Sikadur 330. Ce sont des systèmes époxy bi-composants qui présentent tous deux un comportement de type élastique fragile. Par ailleurs, un autre adhésif industriel de dénomination DP460 a également été étudié. Il présente quant à lui un comportement de type élastoplastique, et les résultats donnés pour ce matériau correspondent donc à la limite d'élasticité.

Les différentes éprouvettes cylindriques et les haltères ont été réalisées au moyen de moules en silicone. Les essais ont été effectués 48h après le début de polymérisation. Les résultats des essais sont rassemblés sur la Figure 2 dans des diagrammes contrainte déviatorique/contrainte hydrostatique. Ils sont illustrés de deux manières différentes: la Figure 2a montre directement les valeurs déterminées par les différents essais, tandis que la Figure 2b permet d'identifier les enveloppes de rupture ou de limite élastique.

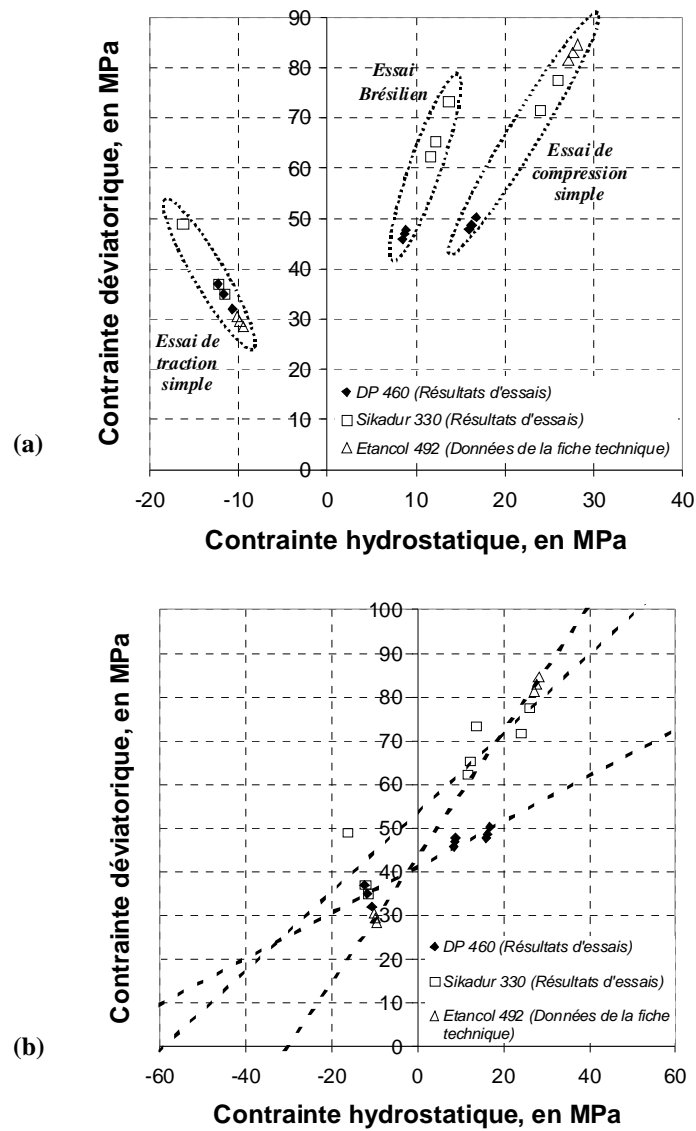


Figure 2. Résultats des essais dans le diagramme *Contraente de Von Mises/Contraente hydrostatique* : illustration des résultats des trois essais (a), des enveloppes de rupture ou de limite élastique (b)

On remarque que les enveloppes de rupture ou de plasticité ne sont pas horizontales, et que la dépendance de la capacité des adhésifs considérés vis-à-vis de la pression hydrostatique est importante. Le critère de rupture ou de plasticité des matériaux adhésifs est donc plus proche d'un critère de type Drucker-Prager. Cela signifie que si la présence d'arrachement (contrainte de pression hydrostatique négative) est en effet néfaste au joint collé, puisqu'il tend à diminuer les capacités de l'adhésif en cisaillement, la présence de compression est au contraire bénéfique et tend à augmenter la capacité en cisaillement de l'adhésif. Ceci a également été mis en relief par Si Larbi et al. (2009) dans le cas du collage béton/acier. Ce constat nous a convaincu de travailler sur une géométrie qui créerait de manière naturelle des efforts de compression en bout de joint, à savoir un joint « courbe ». Bien entendu, il existe d'autres moyens de conférer une contrainte de compression à un joint collé comme un système de frettage par exemple. La différence entre un système de frettage et l'utilisation d'une géométrie courbe réside dans l'évolution ou non de l'effort de compression. Dans le cas, d'un système de frettage, celui-ci est constant et déterminé par le serrage initial. Dans le cas du joint courbe, celui-ci évolue avec l'effort appliqué.

3. Développements théoriques sur le transfert des efforts

Dans un premier temps, deux analyses théoriques seront présentées. La première relève de la mécanique linéaire classique qui permet de s'intéresser aux champs de contrainte dans le joint collé. On notera que deux champs de contrainte nous ont particulièrement intéressés: le champ de cisaillement hors plan, et le champ d'arrachement dans le joint de colle. La seconde relève de la mécanique linéaire de la rupture, et repose sur un équilibre énergétique. Elle permet d'étudier le comportement des fissures au sein des structures, et la facilité avec laquelle elles peuvent se propager. Ces deux approches sont complémentaires, puisque la première permet d'étudier l'influence de la géométrie sur les champs de contrainte et donc sur la capacité du joint collé. La seconde permet de s'intéresser au comportement en fatigue du joint réalisé.

3.1. Analyse des contraintes

Un modèle aux éléments finis a été mis en œuvre sur le code commercial Abaqus pour déterminer les champs de cisaillement et d'arrachement au sein du joint de colle, dans le cas du joint à simple recouvrement (Chataigner, 2008). Ce modèle repose sur une hypothèse de déformations planes et les éléments utilisés sont des éléments linéaires quadrilatéraux non réduits. On notera que la présence de sauts de module conduit à des phénomènes de singularités aux extrémités du joint. Les valeurs extrêmes des champs de contrainte au bord sont donc dépendantes du maillage, et il faut considérer ces valeurs avec précaution. La densité du maillage choisie dans notre étude permet d'obtenir quatre éléments carrés dans l'épaisseur de la couche de colle. Une couche de matériau

composite d'épaisseur 1.2 mm repose sur une couche d'adhésif d'épaisseur 0.25 mm. Le troisième adhérent (acier dans le cas des essais réalisés) n'est pas modélisé car il est supposé infiniment rigide par rapport à l'assemblage. Deux types de contraintes dans le joint collé sont étudiés : le cisaillement et l'arrachement. On notera que le frettage aura une incidence sur l'arrachement. Il convient de comparer les résultats entre un joint courbe et un joint plan pour étudier l'influence de la géométrie sur ces deux composantes. Deux comportements d'adhésifs ont été étudiés : un comportement élastique fragile dont les résultats sont donnés en Figure 3, et un comportement élastoplastique de type Drucker-Prager dont le comportement est décrit sur la Figure 4.

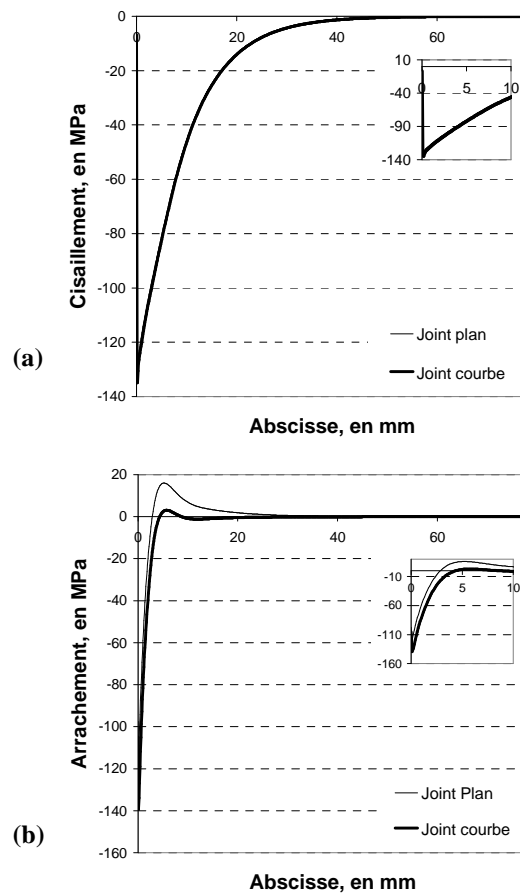


Figure 3. Comparaison des contraintes de cisaillement (a) et d'arrachement (b) entre joint plan et joint courbe pour un même effort appliqué et pour un adhésif élastique

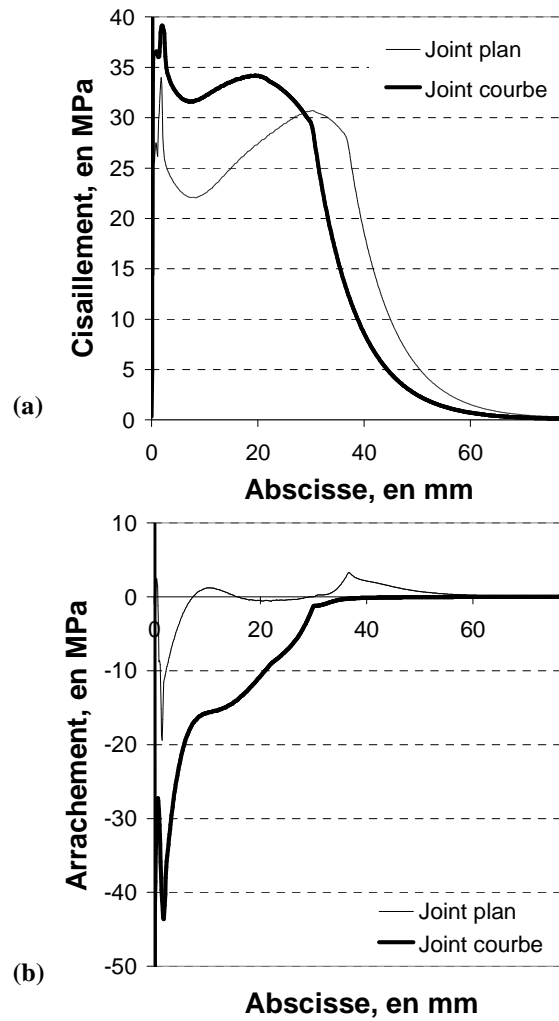


Figure 4. Comparaison des contraintes de cisaillement et d'arrachement entre joint plan et joint courbe pour un même effort appliqué et pour un adhésif élastoplastique

Dans le cas d'un adhésif à comportement élastique fragile (Figure 3), on constate que la courbure a peu d'incidence sur le profil de la contrainte de cisaillement. Les phénomènes de transfert sont bien associés à une longueur caractéristique (longueur

d'ancrage) qui est ici de l'ordre de 40 mm. En revanche, la courbure affecte fortement la contrainte d'arrachement puisqu'elle permet d'augmenter la contrainte de compression en bout de joint, et surtout, d'éliminer quasiment toute contrainte de traction en milieu de joint. Dans le cas d'un adhésif élastoplastique (Figure 4), en ce qui concerne le cisaillement, la courbure permet bien de relever la valeur du palier de cisaillement en augmentant la contrainte de compression en bout de joint. La limite de plasticité est atteinte plus tardivement pour le joint courbe, et la longueur sur laquelle l'adhésif plastifie est alors moins importante.

Dans les deux cas, la courbure permet donc d'augmenter la capacité du joint collé en conférant à l'assemblage une contrainte de compression additionnelle en bout de joint. Il est important de retenir que c'est la dépendance de l'adhésif vis-à-vis de la contrainte hydrostatique qui entraîne une augmentation de la capacité du joint collé. En outre, on retiendra que les phénomènes de transfert en cisaillement dans le cas d'un adhésif élastique fragile sont peu affectés, et que le paramètre longueur d'ancrage utile pour les phases de conception reste par conséquent identique.

3.2. Influence de la pression hydrostatique sur la propagation de fissure

La mécanique linéaire de la rupture s'intéresse à l'équilibre énergétique global du système. En se basant sur un calcul de raideur pour des joints collés ayant des longueurs fissurées différentes (Figure 5), on peut déterminer un taux de restitution d'énergie qui représente la puissance mécanique disponible pour ouvrir une fissure (Griffith, 1920). Lorsque ce taux augmente en fonction de la longueur fissurée, la propagation n'est pas contrôlée puisqu'on accorde au système plus d'énergie que nécessaire. Lorsque celui-ci diminue, la propagation de la fissure est contrôlée. Les calculs sont effectués en utilisant le modèle en éléments finis précédemment décrit. La fissure est représentée par une zone de contact qui peut ou non être associée à un frottement.

Les résultats des calculs sont représentés sur la Figure 5. Chacun des points est déterminé à partir d'un calcul aux éléments finis. On remarque que dans tous les cas, lorsque le frottement n'est pas pris en compte, la propagation de la fissure n'est pas contrôlée. La géométrie dans ce cas n'a pas d'importance. En réalité, il existe forcément des phénomènes de frottement au niveau de la fissure. Si ceux-ci sont pris en considération, on observe une stabilisation de la fissure dans le cas du joint courbe. Pour illustrer clairement notre propos, un coefficient de frottement important de 0,9 a été considéré (ceci augmente l'amplitude des phénomènes observés, notamment la pente de la partie décroissante sur la Figure 5b). Le coefficient de frottement est probablement plus faible en réalité (de l'ordre de 0,4), mais les observations qualitatives restent identiques. La géométrie du joint courbe permet donc à la fois d'augmenter la capacité

de l'assemblage collé, mais aussi de contrôler la propagation d'éventuelles fissures de fatigue, et donc d'améliorer à priori le comportement à long terme du joint.

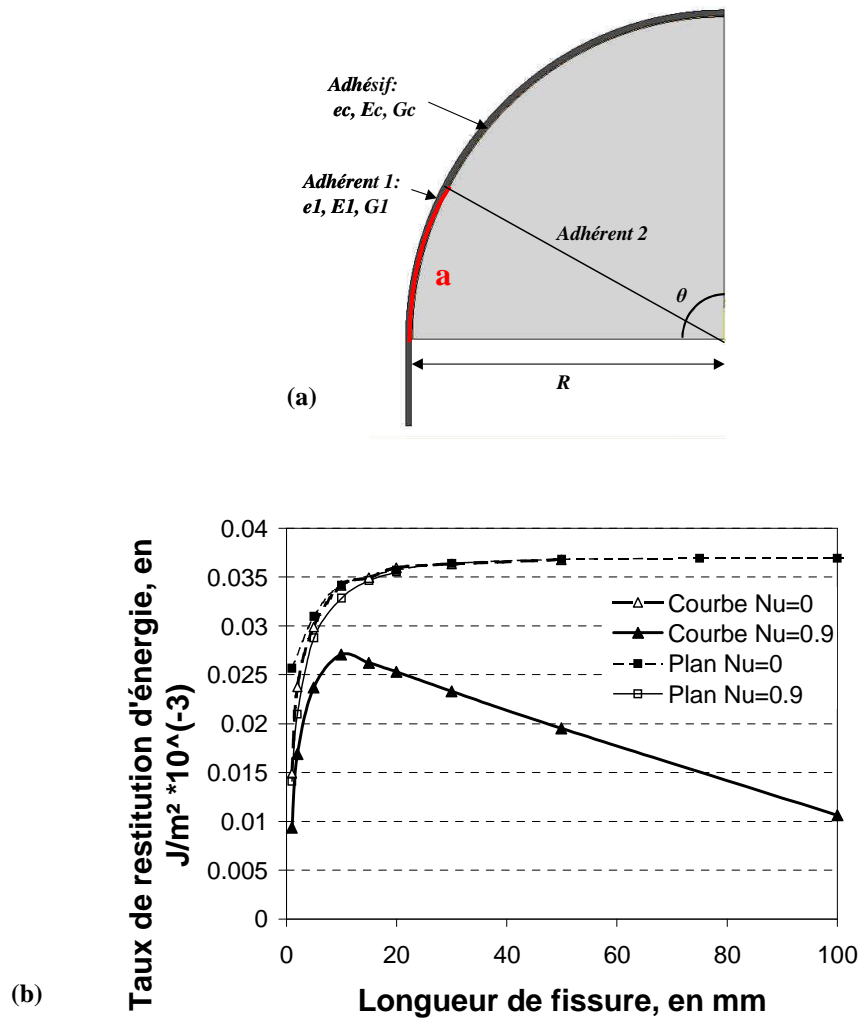


Figure 5. Schéma du joint collé avec une longueur de fissure a (a) et taux de restitution d'énergie en fonction de la longueur de fissure pour les deux types de joints (plan et courbe) et sans frottement en fissure ou avec un coefficient de frottement de 0.9 (b).

4. Investigations expérimentales

Afin de vérifier ou d'infirmer les prédictions théoriques, des investigations expérimentales ont été réalisées au Laboratoire Navier.

4.1. Présentation des essais et réalisation des éprouvettes

Trois géométries d'éprouvettes ont été réalisées avec la même longueur collée, et donc la même quantité de matériaux : un joint plan, un joint courbe, et un joint courbe avec surface de frottement. Cette surface de frottement permet de diminuer l'effort à transmettre par le joint collé. Les trois géométries sont décrites sur la Figure 6. Dans tous les cas, l'adhérent support est un cylindre en acier dont la surface était abrasée et dégraissée à l'acétone avant collage, et la longueur de collage L_c est identique.

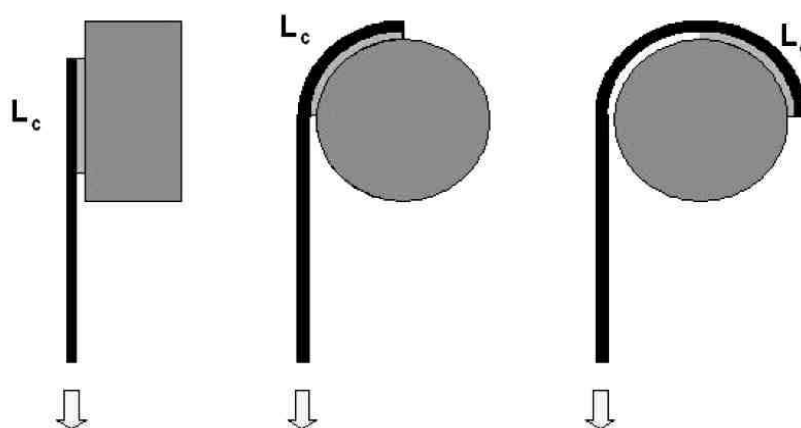


Figure 6. Schéma des trois échantillons testés

Différents adhérents et adhésifs ont été testés pour cette première série d'essais. En ce qui concerne les adhérents, deux systèmes composites ont été appliqués : un système de type plat unidirectionnel à fibres de carbone (Module longitudinal de 120 MPa), et un système de type tissu carbone couramment utilisé dans le domaine du renforcement de structures de génie civil.

Le plat unidirectionnel a été réalisé à partir de plis pré-imprégnés de résine époxy polymérisés sous pression à chaud. La réalisation s'est déroulée selon plusieurs étapes : empilement des plis pré-imprégnés sur une surface courbe comportant les différentes

strates utiles pour la cuisson sous vide (Figure 7), cuisson sous vide du plat UD ayant une forme courbe, double encollage et application du plat sur l'adhérent acier. Un temps de polymérisation de l'adhésif de 48h est ensuite respecté avant essai. Cette technique permet de conférer la courbure désirée à l'adhérent avant encollage.

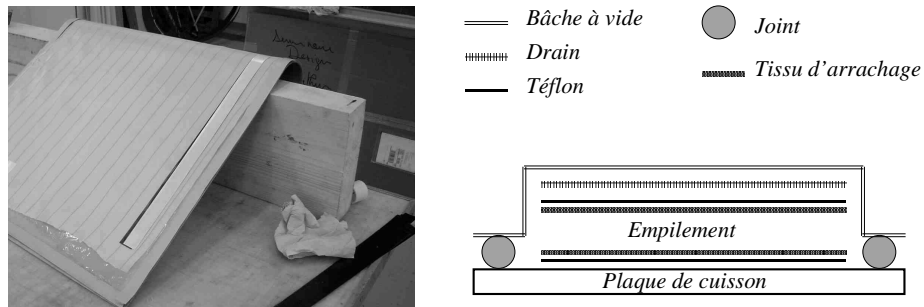


Figure 7. Photographie prise lors de la réalisation des empilements composites, et schéma du système de cuisson.

Le second système composite utilisé est un tissu carbone imprégné de résine époxy bi-composant polymérisant à froid. Après avoir imprégné le tissu, et encollé le support acier, le tissu est appliqué sur la surface acier. On laisse ensuite la résine polymériser à température ambiante pendant 48h. Ce procédé permet également de conférer facilement la courbure désirée au joint collé.

Les deux résines étudiées sont une résine élastique fragile, la Sikadur 330, appliquée pour les deux systèmes composites ; et une résine élastoplastique industrielle, la DP460 appliquée pour le plat unidirectionnel à fibres carbone seulement. Des photos des échantillons sont présentées sur la Figure 8.

4.2. Résultat des investigations expérimentales

Un dispositif spécifique d'essai a été conçu au laboratoire Navier. Celui-ci est présenté sur la Figure 9 et permet de tester des assemblages courbes et plans en assurant un alignement de l'adhérent composite avec l'axe de la machine de traction utilisée. La capacité de la machine de traction est de 100 kN. L'essai est piloté en déplacement avec une vitesse de traverse constante.

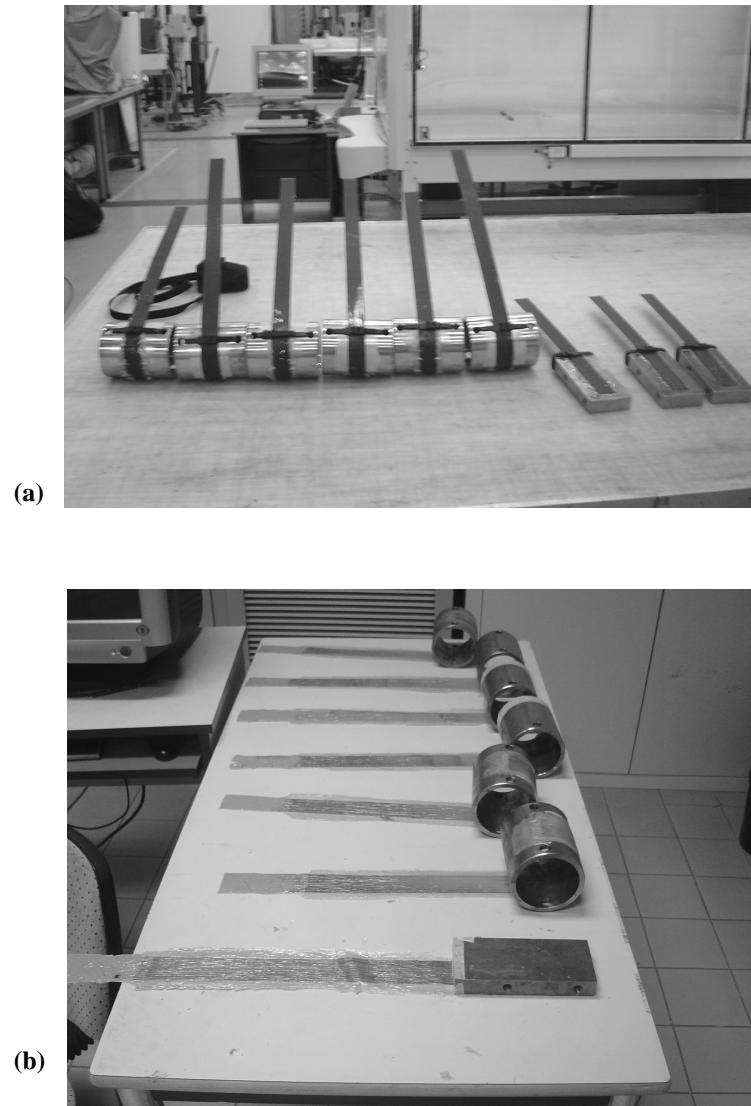


Figure 8. Photographies des joints collés réalisés avec des empilements de plis unidirectionnels préimprégnés avec une résine polymérisant à chaud (a), ou avec des tissus de fibres de carbone imprégné de résine polymérisant à froid (b).

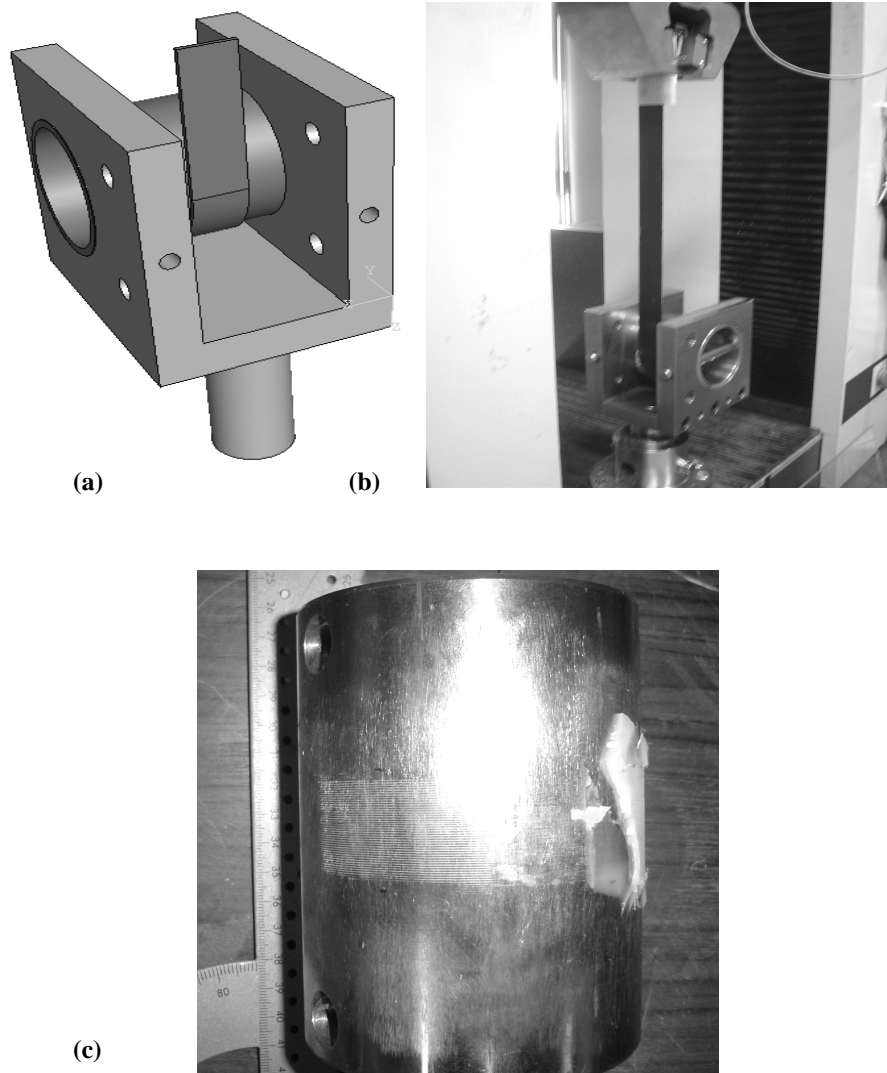


Figure 9. Schéma du dispositif d'essai (a), photographies d'un essai (b) et d'une éprouvette après rupture montrant le marquage de l'acier dans la zone de frottement (c)

Deux types de ruptures différents ont été observés : une rupture cohésive dans l'adhésif (lieu de rupture dans le joint de colle), ou une rupture du renfort en traction. On notera également que l'observation après essai des surfaces d'acier dans la zone de frottement permet de relever un marquage important de la surface, confirmant l'importance de prendre en compte le frottement dans l'approche théorique. Les résultats des essais en termes de mode de rupture et de capacité sont regroupés dans le Tableau 2 pour les différents échantillons.

Tableau 2. Résultats des essais sur joints plans et joints courbes

Procédé	Adhésif	Configuration	Lieu de rupture	Capacité MPa	Ecart-type, en %	Augmentation par rapport au joint plan
<i>Plat carbone</i>	<i>DP 460 (Ductile)</i>	Plan	Joint de colle	641	13	---
		Courbe	Joint de colle	785	23	22%
		Courbe et frottement	Joint de colle	1167	4	82%
<i>Plat carbone</i>	<i>Sikadur 330 (Élastique fragile)</i>	Plan	Joint de colle	656	13	---
		Courbe	Renfort en traction	2242	5	(242%)
		Courbe et frottement	Renfort en traction	1935	8	(195%)
<i>Tissu carbone</i>	<i>Sikadur 330 (Élastique fragile)</i>	Plan	Joint de colle	283	25	---
		Courbe	Renfort en traction	349	6	(23%)
		Courbe et frottement	Renfort en traction	374	6	(32%)

De manière générale, on observe une augmentation de la capacité de l'assemblage avec l'utilisation du joint courbe. Dans le cas du plat carbone collé avec l'adhésif

ductile, cette augmentation est conséquente et montre l'intérêt d'une zone de frottement en entrée de joint. Il reste cependant à vérifier que dans le cas de sollicitations cycliques (fatigue), les phénomènes de frottement ne s'estompent pas dans le temps. Dans le cas du plat collé avec une colle élastique fragile, l'augmentation de capacité est très importante et conduit à une modification du mode de rupture qui passe d'un mode cohésif dans la résine à une rupture en traction de l'adhérent. Cette modification du mode de rupture est matérialisée par des parenthèses dans la colonne « Augmentation par rapport au joint plan » du Tableau 2 puisque cette augmentation sous-estime la capacité réelle du joint collé. Dans le cas du tissu collé avec une résine élastique fragile, le mode de rupture est lui aussi modifié, passant d'un mode cohésif dans la résine à une rupture en traction de l'adhérent composite. On observe une légère augmentation de la capacité de l'assemblage qui, de nouveau, est une borne inférieure en raison de la rupture de l'adhérent.

5. Conclusions et perspectives

Cette étude présente les investigations réalisées sur une nouvelle géométrie d'ancrage par collage de haubans plats, basée sur l'utilisation de joints courbes.

La première étape a consisté à caractériser le comportement mécanique de différents adhésifs, afin d'étudier leur dépendance vis à vis de la pression hydrostatique. Il est ressorti que la pression hydrostatique joue un rôle important sur les propriétés des adhésifs et doit donc être prise en compte dans le critère de rupture.

La seconde partie a porté sur la modélisation mécanique de deux types d'assemblages collés : le joint plan classique, et une nouvelle géométrie, le joint courbe, visant à augmenter naturellement la pression hydrostatique en bout de joint. L'étude des champs de contrainte a montré que la courbure n'affecte pas le transfert des efforts en cisaillement, mais conduit à une augmentation conséquente de la contrainte de compression (donc de la contrainte de pression hydrostatique) à l'extrémité du joint. Une analyse basée sur les concepts de mécanique de la rupture a permis quant à elle, de montrer que la géométrie courbe permet de stabiliser la propagation de la fissure, et donc d'obtenir théoriquement de meilleures performances en fatigue.

La troisième étape a consisté à valider les résultats théoriques en réalisant des investigations expérimentales sur assemblages collés ayant des géométries de joints courbes. Elle nous a permis de vérifier que la courbure induit bien une augmentation de capacité de l'assemblage dans le cas de l'adhésif élastoplastique, et a de surcroît mis en relief l'importance du phénomène de frottement sur la capacité du joint. Dans le cas de l'adhésif élastique fragile, des investigations supplémentaires sont nécessaires, mais une augmentation très significative de la capacité portante de l'assemblage a pu être démontrée (multipliée par trois dans le meilleur des cas et accompagnée d'une rupture en traction de l'adhérent, et non d'une rupture dans le joint de colle).

Un brevet a été déposé sur la géométrie courbe qui semble offrir des perspectives intéressantes (Caron et Chataigner, 2008). Bien que l'application envisagée ici concerne un ancrage de hauban pour passerelle, ce type de joint courbe offre de nombreuses possibilités d'applications en génie civil et dans d'autres domaines industriels.

Des études additionnelles portant sur le comportement en fatigue de l'assemblage sont en cours et devraient permettre de répondre à certaines des questions soulevées dans cette étude. On en retiendra les principales qui portent sur la définition des domaines de résistance ou de plasticité des adhésifs et leur évolution dans le temps, le contrôle de la fissuration dans le cas de la géométrie courbe, les questions associées à la tribologie des surfaces présentes et l'influence d'éventuels traitements de surface. En outre, des études portant sur le vieillissement des résines époxy sont menées conjointement par l'IFSTTAR et le Département Laboratoire d'Autun (Benzarti et al., 2011), en vue de mieux appréhender le comportement à long terme et la durée de vie des assemblages collés.

6. Bibliographie

- Benzarti K., Chataigner S., Quiertant M., Marty C., Aubagnac C., « Accelerated ageing behaviour of the adhesive bond between concrete specimens and CFRP overlays », *Construction and building materials*, vol. 25(2), 2011, p. 523-538.
- Caron J.F., Chataigner S., Dispositif d'ancrage de plats utilisables notamment dans le domaine du génie civil, Brevet N° 08/06635 du 26-11-2008, 2008.
- Caron J.F., Julich S., Baverel O., « Self-stressed bowstring footbridge in FRP », *Composite Structures*, vol. 89(3), 2009, pp. 489-496
- Chataigner S., Caron J.F., Aubagnac C., Conception et dimensionnement d'un ancrage de hauban plat en composite. In : Comptes-rendus des 15^e Journées Nationales sur les Composites (JNC15), Publiés par C. Hochard & J. Lamon, Marseille, 6-8 Juin 2007.
- Chataigner S., Conception et dimensionnement d'un ancrage de hauban plat en matériaux composites, Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, Institut Navier, 2008.
<http://pastel.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/11/10/PDF/theseSChataigner.pdf>
- Clément J.L., Chaussadent T., Renforcement des ouvrages en béton: bilan de deux opérations de recherche du LCPC, OA54, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2006.
- Griffith A.A., « The phenomena of rupture and flow in solids », *Philosophical transactions Royal Society of London*, A221, 1920, pp. 163-198
- Hamelin P., Réparation et renforcement des structures au moyen des matériaux composites : Recommandations provisoires, Techniques de l'Ingénieur, AM5615, 2002.

- Limam O., Foret G., Ehrlacher A., « RC two-way slabs strengthened with CFRP strips: experimental study and a limit analysis approach », *Composite Structures*, Vol. 60, 2003, pp.467-471.
- Pham H.S., Optimisation de la connexion et comportement en fatigue de la connexion bois-BFUP pour de nouveaux ponts mixtes, Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.
- Si Larbi A., Ferrier E., Hamelin P., « Concrete to steel lap joint failure criteria under combined shear and peeling stress », *Journal of constructional steel research*, Vol. 65(2), 2009, pp. 386-394.
- Wang W., Towards an improved understanding of strength and anisotropy of cold compacted powder, PhD Thesis, Drexel University (USA), 2007